定在波型超音波アクチュエータの低速駆動法*

伊東 真実子^{*1}, 長縄 明大^{*2}

Method for Low-Speed Driving of a Standing-Wave-Type Ultrasonic Actuator

Mamiko ITO^{*1} and Akihiro NAGANAWA^{*1} Department of Mechanical Engineering, Akita University
1-1, Tegata-gakuen-machi, Akita-city, Akita, 010-8502, Japan

Ultrasonic actuators have applicability in various fields such as mechanical engineering and medical engineering owing to their advantage such as high torque, soundless motion and so on. However, these actuators have a dead-zone property, that is, they cannot be driven if it must be applied a signal having a driving frequency near the resonance frequency or a high voltage above a certain voltage. Therefore, it is difficult to drive ultrasonic actuators at low-speed. In this note, we propose a method for low-speed driving of a standing-wave-type ultrasonic actuator which can drive using one phase signal. In this method, an intermittent signal generated using a standard PC is supplied to the actuator instead of a continuous signal. Experimental results show that the property of a low-speed drive of less than 5 rpm was achieved with the proposed method.

Key Words : Mechatronics, Actuator, Piezo-Element, Standing-Wave-Type Ultrasonic Actuator, One Phase Signal, Low-Speed Driving Method

1. は じ め に

超音波アクチュエータは、体積当たりのトルクが他のモータより大きい、動作音がほとんどしない、非磁性材を用いて製作できるなどの理由から、工学や医療など様々な分野において広く用いられている。超音波アクチュエータには、進行波型、定在波型、インパクト駆動型など様々なタイプがあるが、これらは用途に応じて使い分けられる⁽¹⁾。これらの中で最も広く用いられているのは、進行波型であると考えられるが、一般的に位相の異なる二相信号により駆動するため効率は低く、小型化に適しているとは限らない。これに対して、定在波型は一相信号による単相駆動が可能であれば低コストで高効率であり、小型化に適している。しかし、いずれの超音波アクチュエータにおいても、共振特性に近い駆動周波数の信号や、ある値以上の電圧を印加しなければ駆動できない不感帯を有している。このため、低速駆動を実現することは困難であることから、進行波型の市販ドライバでも 30rpm 以下の速度特性を実現できない仕様のものが多い。

著者らは進行波型超音波アクチュエータに対して、位相差駆動方式のドライバ回路を開発して低速特性を実現し、高精度な位置決め制御を実現した⁽²⁾。これに対して、小関らは、差動歯車を用いて二つの進行波型超音波アクチュエータの回転速度差を取ることで、0.5rpm の低速特性を実現できることを示した⁽³⁾。このように、進行波型では様々な手法により、低速駆動を実現するための検討がなされてきたが、単相駆動が可能な定在波型に対しては、ほとんど報告がなされていないのが現状である。

本論文では、単相駆動が可能なトラス構造の定在波型超音波アクチュエータ⁽⁴⁾を用いて、アクチュエータに付加機構を取り付けることなく、低速駆動を実現する方法の検討を行った実験結果について述べる。通常、超音波アクチュエータには連続的に正弦波が印加されるが、本手法では断続的、すなわちサンプリング周期を基準時間とし

* 原稿受付 2010年12月27日

^{*1} 学生員, 秋田大学大学院工学資源学研究科機械工学専攻
(〒010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1-1)^{*2} 正員, 秋田大学大学院工学資源学研究科機械工学専攻
Email: itomami@control.mech.akita-u.ac.jp

て、この時間の整数倍の間、アクチュエータに電圧波形を印加して、その後、オフとし、再び同じ時間幅を持つ波形の印加とオフを繰り返すことにより実現した。

2. 実験装置の構成と速度特性

図1に本研究で用いた定在波型超音波アクチュエータの模式図を示す。アクチュエータの大きさは、幅が5.2mm、高さが5.2mm、厚さは1.6mmである。アクチュエータには、二つの積層型圧電素子（PE：Piezo-element）とチップ、ベースの四つの部品が用いられており、直交するように配置されたPEはベースに固定されており、その反対側に取り付けたチップにより物体を駆動する。

図2に本研究で用いた実験装置の構成図を示す。本装置では、図1に示した超音波アクチュエータが、直径32mmの回転円板に対して与圧をかけながら設置されており、この円板を回転させるものである。円板の回転速度は、エンコーダ（分解能256pprを4通倍処理）を使用して回転角度を求め、これをPC内でサンプリング周期 h ごとに処理して求めるものとする。駆動回路には、オペアンプによる増幅率2倍の非反転増幅回路と、プッシュプル・エミッタ・フォロアの電力増幅回路を組み合わせ構成した⁽⁵⁾。駆動波形は、関数発生器から正弦波を発生させ、駆動回路で増幅して超音波アクチュエータに印加することができる。駆動波形の印加とオフは、PC内のDIO（Digital Input Output）ボードからマルチプレクサ回路に指令を出すことにより行った。

本研究で用いた定在波型超音波アクチュエータでは、片方のPEのみに電圧を印加して駆動する単相駆動が可能である⁽⁴⁾。すなわち、一つのPEに正弦波状の電圧を印加すると、そのPEは伸長するが、このとき、もう一方の電圧が印加されていないPEが仮想的なバネ-ダンパ系となり、その結果としてチップに楕円運動を生成することができ、物体を駆動することができる。逆回転をさせる場合には、もう一方のPEに電圧を印加することにより行うことができる。

図3に駆動周波数に対する回転速度特性を示しており、図中のCWが正転方向、CCWが逆転方向の結果である。実験は、関数発生器から正弦波を発生させ、駆動周波数を160kHzから5kHzずつ高くしながら、振幅5Vの電圧を駆動回路に入力した。なお、オペアンプ回路の電源電圧は $\pm 6.5V$ とした。図より、CCW方向には160kHz

Fig. 1 Standing-wave type ultrasonic actuator

Fig. 2 Block diagram of rotational equipment

Fig. 3 Properties of rotational speed for driving frequency

の周波数でも駆動することができたが、CW 方向には 170kHz 以上に周波数を高くしなければ駆動することができなかった。また、180～185kHz くらいの周波数で、回転速度が高くなったため、この区間の周波数を 1kHz ずつ変更したところ、CCW 方向では 183kHz のとき、CW 方向では 185kHz の時に最高速度を示した。なお、実験結果には、CW および CCW 方向に対して、また駆動周波数に対しても特性にばらつきが見られるが、この主な原因として円板に組み込まれているベアリング摩擦が考えられる。

3. 低速駆動法と実験結果

図 3 に示したように、本研究で用いた定在波型超音波アクチュエータでは、CW 方向で 3.8rpm（駆動周波数 170kHz）までの低速駆動しか実現することができず、このとき CCW 方向では 6.3rpm の速度を示しており、駆動特性に差が見られた。この実験結果は、関数発生器から発生させた正弦波を連続的に印加した結果であり、駆動周波数を変更しても低速駆動を実現することが困難であることを示している。

そこで、連続的に波形を印加するのではなく、断続的に印加する方法について検討した。図 4 に低速駆動を実現するための印加電圧の概略図を示す。横軸が経過時間、縦軸が正弦波の電圧を示しており、図中の τ が正弦波一周期であり、この逆数 $1/\tau$ が駆動周波数となる。駆動周波数は、図 3 にも示すように約 180kHz くらいになるため、この周波数をサンプリング周波数とする制御装置を実現することは困難である。そこで、一般的な PC で実現可能なサンプリング周期を h とし、この h の整数倍の時間だけ波形を印加し、その後、波形を印加せず、オフとする方法を検討した。図では、時間 α だけ波形が印加され、その後の時間 β はオフとする様子を示しており、この $\alpha + \beta$ の印加波形を一周期として、これを繰り返し印加する。これにより、定在波型超音波アクチュエータには、断続的な波形が印加されることになる。

図 5, 6 に図 4 の断続的な波形を印加した場合の実験結果を示す。実験は、サンプリング周期が $h=2\text{ms}$ 、駆動周波数が図 3 の結果より CW と CCW 方向の最高速度の中間となる 184kHz とした。図 5 は、印加時間 α をサンブ

Fig. 4 Driving wave for low speed rotation

Fig. 5 Rotational speed for applying time α
(intermittent wave)

Fig. 6 Experimental results for low speed driving method
(intermittent wave)

リング周期 h の整数倍 (1~6 倍) とした場合に測定した回転速度を示す．なお, β は $6h=12\text{ms}$ と固定した．図より, 印加時間 α がサンプリング周期 h と等しい場合 ($\alpha = h = 2$) には, 駆動することができなかったが, 印加時間を 2 倍, 3 倍と長くしていくことにより, 回転速度はほぼ線形になっている様子がわかる．また, 印加時間 10ms より長くなると CW と CCW 方向で多少のばらつきが見られるが, 5rpm 以下の回転速度を実現することができた．この回転速度は, 図 3 に示す連続的な波形印加の際には実現できなかった値である．

一方, 図 6 は印加時間 $\alpha = 3h = 6\text{ms}$ のときの経過時間に対する回転速度を示している．図より, 駆動時間が長くなると多少の変動が見られるものの, CW および CCW 方向ともに, 0.9rpm のほぼ一定な回転速度を実現することができた．

以上の結果より, 定在波型超音波アクチュエータを低速駆動する方法として, 圧電素子に印加する正弦波を, 連続的ではなく断続的に与えることにより可能であると考えられる．

4. お わ り に

本研究では, 単相駆動が可能な超音波アクチュエータを低速駆動させる方法について, 実験的な検討を行った．その結果, これまで連続的な正弦波を印加して駆動していたが, 本研究で断続的な波形を印加する方法を提案し, 5rpm 以下の回転速度を実現できることを示した．

謝 辞

超音波アクチュエータに関する技術指導, ならびに本研究に使用した装置を貸与して頂いたコニカミノルタテクノロジーセンター株式会社の関係者に謝意を表する．

文 献

- (1) 内野研二, 石井孝明 (共訳), マイクロメカトロニクス (2007), p.311, 森北出版．
- (2) 長縄明大, 山尾拓也, 佐藤生馬, 岡正人, 田中幹也, 正宗賢, “MRI 対応穿刺治療ナビゲーションロボットの高精度制御”, 日本 AEM 学会誌, Vol. 18, No. 2 (2010), pp.79-85．
- (3) 小関義彦, 鎮西清行, “差動歯車による超音波モータの低速駆動 - 構造と運動学, 速度選択性 -”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (2007), 1A2-K01．
- (4) 松田伸也, 松尾隆, “二本の圧電素子を直交して配置するマイクロアクチュエータ”, コニカミノルタテクノロジーレポート, Vol. 2 (2005), pp.101-104.
- (5) 鈴木雅臣, 定本トランジスタ回路の設計 (1991), p.85, CQ 出版.